第41卷 第10期
2024年10月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 10
Oct. 2024

气候变化背景下白皮松在中国潜在适宜分布预测

樊玉科[1]， 任 菊[1]， 王润龙[1]， 周栋栋[1]， 潘自凯[2]， 张晓玮[1]， 周晓雷[1]

（1. 甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070；2. 东北林业大学林学院，黑龙江 哈尔滨 150040）

摘 要：研究旨在预测白皮松潜在适生区分布及气候变化对其的影响，明确其未来适宜的分布范围，为白皮松保护和其在生态工程建设中的应用提供参考。基于白皮松83个野生分布点及气候因子数据，利用MaxEnt模型和ArcGIS软件，模拟白皮松当前和未来3种（2080—2100年，低温室气体排放情景、中温室气体排放情景和高温室气体排放情景）气候变化情景（SSP126、SSP370、SSP585）下的潜在适生区分布。MaxEnt模型模拟结果AUC（受试者工作特征曲线下面积值）值均>0.973，预测结果精度较高。当前气候条件下，白皮松的潜在适生区主要分布在陕西省、山西省南部、甘肃省东南部、河南省和湖北省西北部等地，总面积约74.5×10^4 km^2，未来气候变化背景下，核心适生区面积均有不同程度的缩减，温度为白皮松潜在适生区分布的主限制因子；中、低温室气体排放情景下，白皮松潜在适生区分布的限制因子仍以温度为主；高温室气体排放情景下，全球温度升高加快，降雨量成为影响白皮松适生区分布的主要限制因子，白皮松适生区质心向东偏移，尤其在温室气体高排放浓度下更敏感，迁移距离更远。本文结合白皮松当前和未来潜在适生区的变化，提出了对白皮松保护的建议，且对利用白皮松进行生态工程建设提供参考价值。

关键词：最大熵（MaxEnt）模型；白皮松；气候变化；潜在分布区；中国

气候是影响植物物种分布的重要驱动因素，其变化不仅会改变植物物种的适应性，还对植被生长发育以及生存带来极大挑战[1-4]。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第六次评估报告指出，在当前的温室气体排放情景下，到2100年全球升温可达到2.2~3.5 ℃[5]，这将导致未来植物物种地理分布格局改变，甚至加快植物物种灭绝速度[6]。因此，研究气候变化对物种地理格局的影响，有助于更好地应对气候变化对植物物种分布范围变化所产生的影响[7]。物种分布模型是研究物种适生区域受气候环境变化影响的重要工具[8-9]，通过野外调查、标本室记录及文献记载等途径，获得物种的地理分布数据，结合相应的算法推测物种生物生态位，依据分布点的密集情况以概率的形式表现物种对生境的喜好程度，预测物种潜在适生区对气候变化的响应[10]，常用的方法包括，生物气候模型（BIOCLIM）[11]、最大熵模型（MaxEnt）[12]、规则集遗传算法模型（GARP）[13]、广相模型（GAM）[14]及广义线性模型（GLM）[15-16]。其中MaxEnt模型相比其他模型具有更高的耐受性和预测精度，预测效果相对较好[17-19]，已被广泛应用于预测物种的分布[20-21]。

白皮松（*Pinus bungeana*）为松科（Pinaceae）松属（*Pinus*）植物[22]，是我国特有珍稀濒危树种，东亚仅存三针松属[23]。白皮松分布于我国西北、华北地区等海拔800~1300 m的岩缝、山脊或山坡[24]，对维持我国西部地区及北方干旱地区，特别是石灰质山地的生态环境稳定具有重要生态价值[25]，同时具有病虫害少、抗旱、耐瘠薄[26]、适生于石灰岩山地等特点，又是生态工程优良造林树种和园林绿化常用树种[27]。然而近些年来，白皮松天然林的分布区和面积越来越狭窄，多为小面积的块状、片状或零星分布[28]，表现出显著的片段化特征，这种不连续的分布特征除因树种老化、自身更新能力低和人为因素外，还与气候条件的不断变化有关[29]。此外，有研

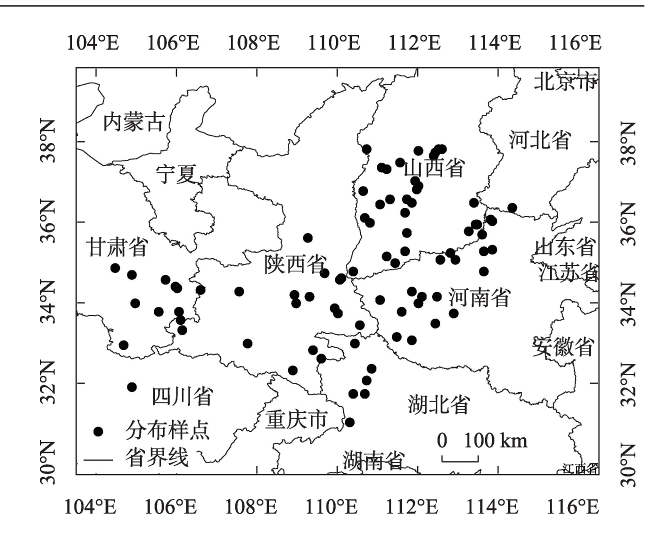
收稿日期：2024-04-01； **修订日期：**2024-07-13
基金项目：国家自然科学基金项目（31860197）；青藏高原东北边缘云冷杉火烧迹地森林演替动态及演替机理研究（03619078）
作者简介：樊玉科（2000-），男，硕士研究生，主要从事植物多样性研究. E-mail: fanyuke823@foxmail.com
通讯作者：周晓雷. E-mail: zhouxl@gsau.edu.cn

究指出，在未来气候变化背景下，白皮松遗传多样性下降的风险更高[30]，这可能会导致白皮松自然种群规模减小，然而目前对白皮松潜在适生区分布的模拟却鲜有报道，且缺少对未来不同情景的讨论[31]。随着全球对气候变化的重视以及节能减排措施的发布，不同政策有不同情景的预测，对未来白皮松潜在适生区分布范围分情景讨论也十分必要。因此，亟须预测白皮松潜在适生区在未来不同情景下的分布，以期为白皮松自然种群的保护提供参考。本研究通过收集分布区范围内白皮松野生分布点，应用MaxEnt模型与ArcGIS软件，对白皮松当前及未来（2080—2100年）分3种情景进行模拟，从CMIP6计划中选取了对中国温度和降雨模拟效果较好的3种最新的代表性浓度路径情景SSP126、SSP370、SSP585，即SSP126代表维持温室气体排放缓和场景，SSP370代表维持温室气体排放中等平稳场景，SSP585代表温室气体高度排放场景[32-33]，旨在明确影响白皮松分布的主导气候因子，量化白皮松的适生范围，并分析当前和未来白皮松适生区质心移动轨迹，明确白皮松在未来的变化趋势，以其更加全面预测气候变化对白皮松分布区的影响。同时，根据不同适生度提出相应保护和管理建议，为我国未来白皮松的保护以及生态工程引种提供参考。

1 材料与方法

1.1 物种分布资料搜集

在白皮松自然分布区系统调查基础上，通过中国植物数字化标本室和全球生物多样性信息库以及查阅相关文献等途径，对于不清楚分布点经纬度的标本，借助百度拾取坐标系统[34-35]，明确分布样地的经纬度数据。从山西、陕西秦岭、四川北部、甘肃南部及天水麦积山、河南西部等地共获取白皮松231条记录信息，并从中去除错误、不在分布范围内、无具体地理信息记录的标本，在此基础上，通过ENMTools软件筛选白皮松的地理分布数据，该软件不依据分布点之间的距离删除冗余的地理分布数据，而是自动匹配环境因子的栅格大小，剔除相同栅格中的多余数据[36]，提高模型对于预测白皮松潜在适生区的地理分布精度，最终保留了83个分布点经纬度数据（图1），导入Excel并保持为CSV格式，



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2020)4619号，对底图边界无修改。下同。

图1 中国白皮松分布样点

Fig. 1 Occurrence sites of *Pinus bungeana* in China

便于构建模型。

1.2 数据获取与处理

物种分布受到气候、土壤条件、地形等非生物因素和生物因素的影响，而气候是影响物种分布格局最重要的影响因素[37-38]。因此，本研究探讨气候因子对于白皮松潜在适生区分布的影响，选取了当前及未来（2080—2100年）3个不同浓度碳排放气候情景：SSP126（低强迫情景）、SSP370（中等强迫情景）和SSP585（高等强迫情景）进行模拟[39]，这3个不同的浓度路径假设预测21世纪末中国年均温增幅分别为1.87 ℃、2.88 ℃、5.51 ℃[40-42]。这些气候情景下载至WorldClim第六期国际耦合模型比较方案（CMIP6）中的分享经济途径，包含19个气候环境变量（表1），坐标系为WGS1984，分辨率为2.5 arc-minutes。由于CMIP6模式与CMIP5模式比较，误差有所减小，CMIP6模式对各种类型的日降水频数分布都有较好的模拟能力，因此，可以更好地体现气候情景[43-44]。

1.3 物种分布模型构建与评估

在上述基础上，将经过筛选和处理的样本信息和环境因素输入MaxEnt模型，其中75%的样本作为训练样本，25%的样本作为实验样本[45]，选择刀切法（Jackknife）进行气候变量重要性评估[46]。将背景点数的最大数目设定为10000，最大迭代次数设定为500，并执行10次以上的循环[47-48]。采用已建立的工作特性曲线（ROC）与横坐标面积（AUC）值评估模

表1　气候变量数据

Tab. 1　Climate variable data

数据图层编号	数据说明	数据图层编号	数据说明
Bio01	年平均温度/℃	Bio11	最冷季度的平均温度/℃
Bio02	每月温差的平均值/℃	Bio12	年降水量/mm
Bio03	等温性/%	Bio13	最湿月的降水量/mm
Bio04	温度季节性差异/%	Bio14	最干月的降水量/mm
Bio05	最热月的最高温度/℃	Bio15	季节性降水量变异系数
Bio06	最冷月的最低温度/℃	Bio16	最湿季度的降水量/mm
Bio07	温度年较差/℃	Bio17	最干季度的降水量/mm
Bio08	最湿季度的平均温度/℃	Bio18	最热季度的降水量/mm
Bio09	最干季度的平均温度/℃	Bio19	最冷季度的降水量/mm
Bio10	最热季度的平均温度/℃		

型预测精度[49-51]。AUC在0~1的范围内,越接近1,则表示预测结果越好,评估方法:AUC 0.50~0.70,为不合格;AUC 0.70~0.80,为一般;AUC 0.80~0.90,为良好;AUC 0.90~1.00预测结果极佳[52-53]。未来(2080—2100年)的分布模拟也按上述方法进行。

根据数据序列本身的统计规律,对适宜等级进行划分,为了使同一等级内方差最小,不同等级间方差最大,利用ArcGIS 10.2空间分析工具中的自然断点法(Natural Breaks)[54]将适宜等级进行划分,再结合白皮松自然分布区,划分为4级,即0.00~0.10为非适生区,0.10~0.33为低适生区,0.33~0.64为中适生区,0.64~1.00为高适生区。为了研究未来气候变化与当前作对比,未来适宜等级的划分与当前一致。然后运用ArcGIS 10.2中的Reclassfy工具,对当前和未来3种气候情景的分布面积进行了计算。

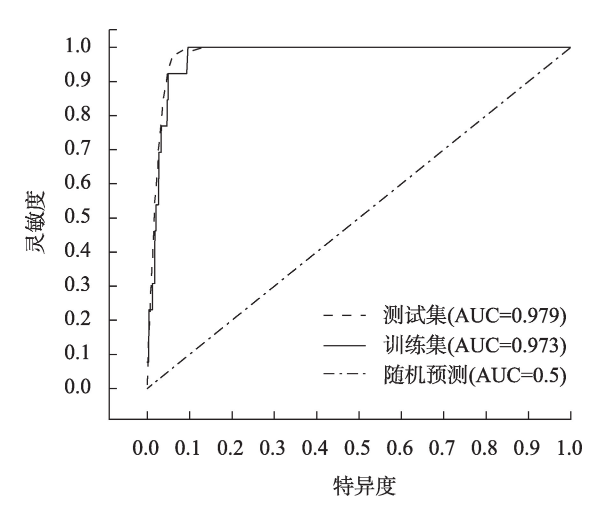


图2　基于MaxEnt模型预测白皮松当前潜在分布的受试者工作特性曲线(ROC曲线)

Fig. 2　Receiver operating characteristic curve (ROC) predicting the current potential distribution of *Pinus bungeana* based on MaxEnt

2　结果与分析

2.1　模型预测与结果分析

模型的准确性依赖于样本的覆盖程度,AUC是一个最好的评价方法[55]。使用MaxEnt对白皮松在当前和未来分布区进行模拟,并得到各预测结果的AUC值。当前气候情景下模型ROC曲线显示(图2),模型训练集数据AUC结果为0.973,未来3种气候情景下模型ROC曲线模型训练集数据AUC结果分别为0.974、0.973、0.975,该结果表示白皮松潜在适生区预测性能好,拟合程度较高,模型模拟结果极佳,表明该模型可用来模拟白皮松在未来的潜在分布。

2.2　适生区分布的主导气候因子

利用MaxEnt模型得出当前和未来3种气候情景下贡献率排名前5的气候因子(表2),在当前的气候条件下,对其贡献最大的5个气候因素为最冷月的最低温度(Bio06,21.1%)、等温性(Bio03,16.4%)、最湿季度的降水量(Bio16,15.4%)、最冷季度的降水量(Bio19,11.6%)和温度季节性差异(Bio04,9.2%),累计贡献率为73.7%。以刀切法为基础,对19个气候因子进行了训练增益(图3),其中训练增益值排名前5的气候因子为最冷月的最低温度(Bio06)、最冷季度的平均温度(Bio11),最干季度的平均温度(Bio09)、等温性(Bio03)、最热季度的降水量(Bio18),通过环境变量贡献率和刀切法两个方面评估影响白皮松分布的主导环境因子。根据MaxEnt模型预测的结果表明,当前气候条件下,贡献率排

表2 MaxEnt模型中各气候因子对白皮松分布的贡献率

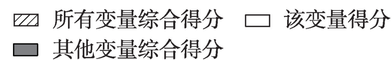
Tab. 2 Contribution rate of each climatic factors for the distribution of *Pinus bungeana* in MaxEnt model

代码	当前	2080—2100年		
		SSP126	SSP370	SSP585
Bio06	21.1%	24.5%	24.1%	18.9%
Bio03	16.4%	9.6%	10.5%	19.8%
Bio16	15.4%	7.7%	6.3%	0.1%
Bio19	11.6%	15.1%	13.7%	10.5%
Bio04	9.2%	14.3%	14.6%	12.5%
Bio12	2%	13.8%	14.9%	21.4%

名前5和基于刀切法分析训练增益值前5的气候因子中，7个气候因子为温度且Bio06和Bio03均为两种方法排名前5的气候因子，说明当前气候条件下，其潜在适生区的分布主要受到温度的制约。

未来中、低两种排放情景下，贡献率排名前5的气候因子均为Bio06、Bio04、Bio03、Bio12和Bio19，其中Bio06仍然是主导限制因子，说明在中、低两种排放情景下，仍以温度为影响白皮松潜在适生区分布的主要限制因子；未来高排放情景下，贡献率排名前5的气候因子为Bio12、Bio03、Bio06、Bio04和Bio19，贡献率最高的为Bio12，表明为适应气候变化年降水量成为影响白皮松潜在适生区分布的主要限制因子。

通过分析环境因素的响应曲线，可以了解某一种生物的生存概率和环境变量因素的相关性，如果某一种生物的生存几率超过0.5，那么它所对应的环境变量因素就会对该生物的生长产生有利影响[56-57]。贡献率较高气候因子的响应曲线(图4)可以反映白皮松对环境的喜好程度，存在概率>0.5时最冷月的最低温度范围为-12~17 ℃时(图4a)，表明白皮松最冷月最低温适宜范围是-12~17 ℃，温度在0 ℃左右最适宜，当温度达到峰值0 ℃之后，随着温度的升高适宜度逐渐下降，超过17 ℃之后不适宜白皮松的生存，量化了白皮松的适生范围；等温性的适宜范围为26%~38%(图4b)，等温性31%左右最适宜，达到峰值31%之后随着等温性的升高适宜度逐渐下降，超过38%之后不适宜白皮松的生存。同时，量化了其他3个气候因子的适生范围分别为最冷季度的降水量0~65 mm(图4c)，温度季节性差异780%~1320%(图4d)，最湿季度的降水量260~500 mm(图4e)。



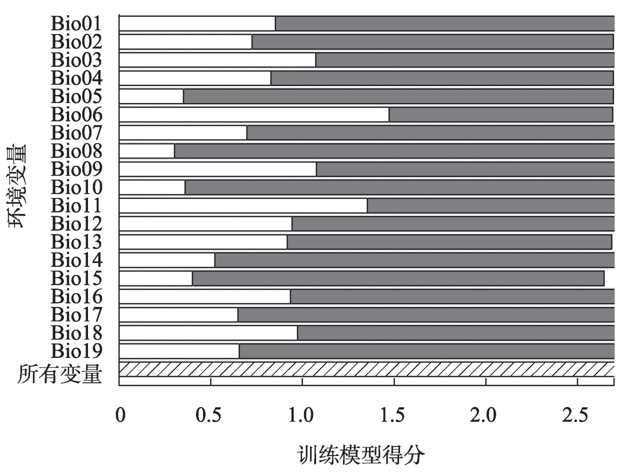


图3 评估环境变量对白皮松分布相对重要性的刀切检验结果

Fig. 3 Jackknife test of evaluating the relative importance of environmental variables to the distribution of *Pinus bungeana*

2.3 当前气候情景下白皮松的适生区分布

通过MaxEnt模型运行的结果，导入ArcGIS中通过自然断点法得到白皮松在中国境内的潜在适生区(图5a)。在当前气候条件下，白皮松在中国境内的潜在适生区主要分布在陕西省、山西省南部、河南省和湖北省西北部、甘肃省东南部等地，面积约为74.58×10^4 km^2，占国土面积的比例约为7.76%。其中高适生区主要分布在甘肃省天水市、陇南市、陕西省宝鸡市、渭南市、铜川市、商洛市、山西省吕梁市、临汾市、河南省焦作市、洛阳市、新乡市等，经过统计面积约为23.23×10^4 km^2，占适生区比例约为31.15%；中适生区主要分布在甘肃省平凉市、庆阳市、陕西省延安市、榆林市、山西省忻州市、朔州市、长治市、河南省郑州市、鹤壁市等，面积约为22.4×10^4 km^2，占适生区比例约为30.03%；低适生区面积主要分布在甘肃省定西市、庆阳市、甘南藏族自治州、陕西省榆林市、山西省大同市、朔州市、河南省南阳市、平顶山市、许昌市、漯河市、河北邢台市、邯郸市、张家口市、湖北十堰市、襄阳市等，约为28.95×10^4 km^2，占适生区比例约为38.82%。白皮松的适生区分布图与当前现实分布点重合度极高，表明MaxEnt模型的预测精度高。

2.4 未来不同气候情景下白皮松在中国的潜在地理分布

利用MaxEnt模型分别预测了白皮松在当前和

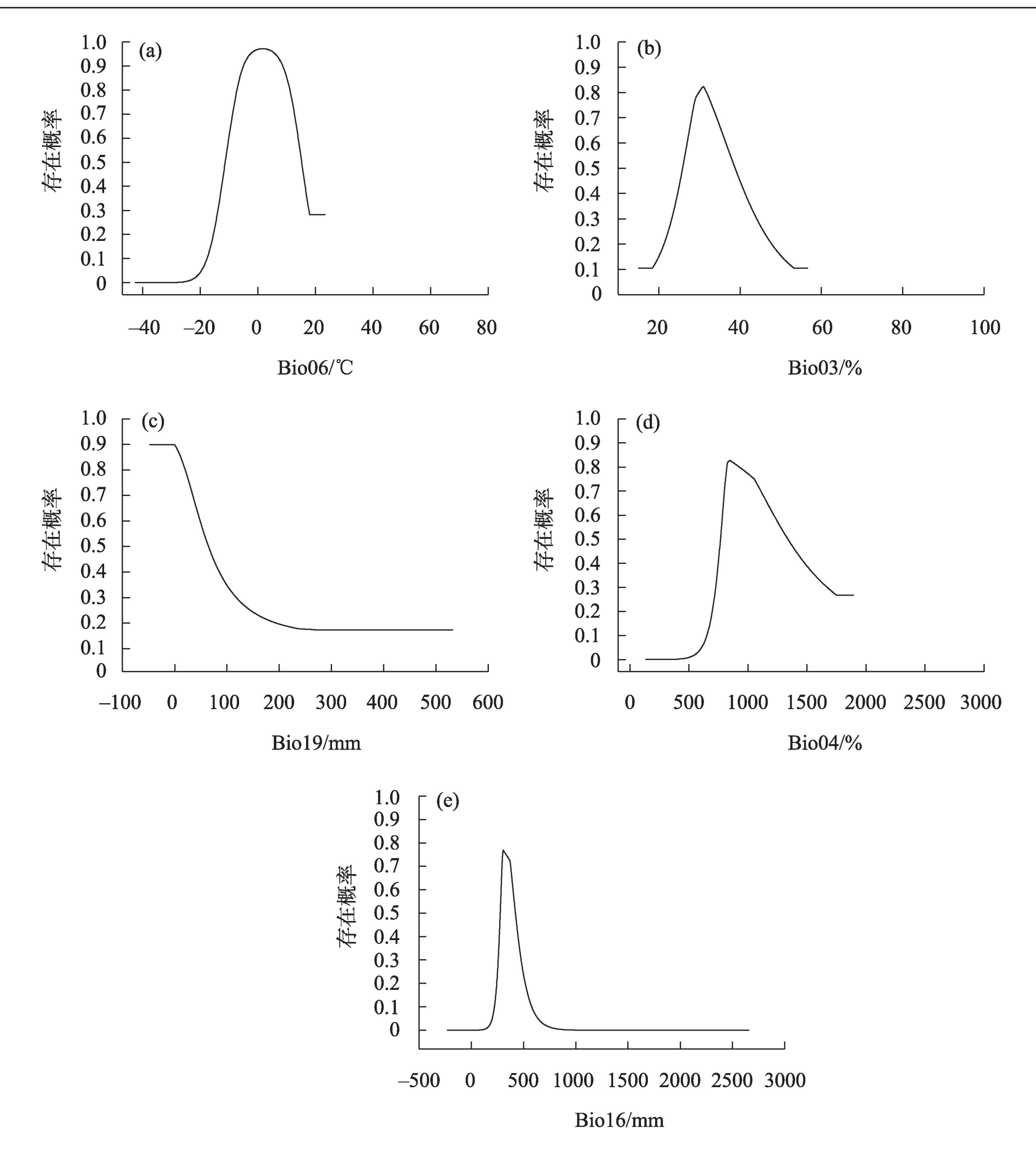


图4 主要环境因素对白皮松分布的响应曲线

Fig. 4 Influence curve of main environmental factors on the distribution of *Pinus bungeana*

未来3个不同碳排放浓度,在中国未来潜在的分布范围,结果如图5和表3所示,在低排放情景下,未来白皮松适生区面积约为70.90×10⁴ km²,较当前气候条件下减少4.93%。在中等排放情景下,适生区面积约为70.76×10⁴ km²,较当前气候条件下减少5.12%。在高排放情景下,未来白皮松适生区面积约为74.91×10⁴ km²,较当前气候条件下增加0.44%。因此,在未来中、低排放情景下,白皮松潜在适生区面积有不同程度的减少,只有在高排放情景下呈现出小范围扩张,且以低适生区面积增加为主。

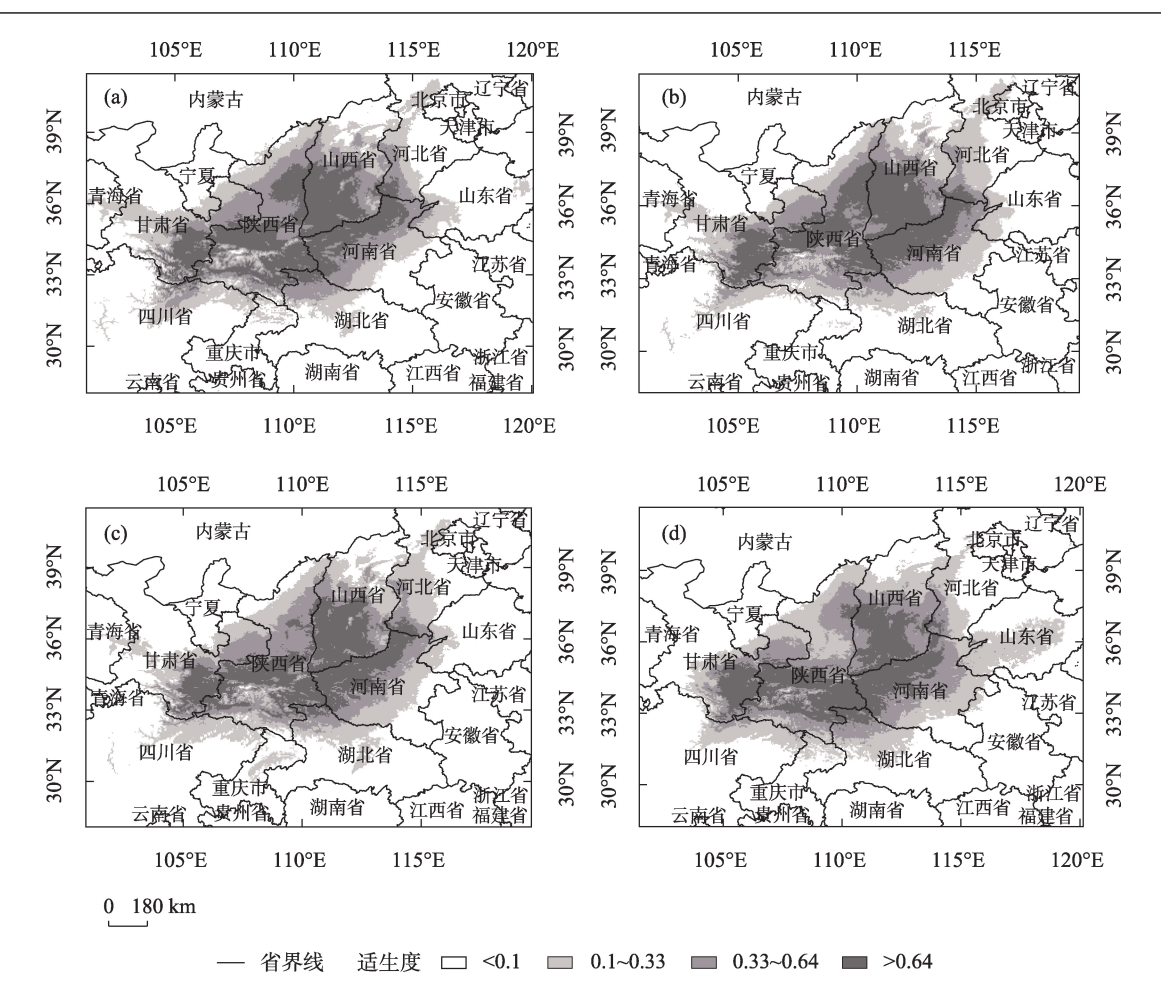
2.5 白皮松潜在分布区的质心转移

在未来不同气候情景下,质心随着碳排放浓度的升高逐渐向东偏移(图6),碳排放浓度越高,迁移距离越大,当前气候条件下,白皮松潜在适生区的质心在33.96°N、107.90°E位于陕西省周至县附近。在未来低排放情景下,白皮松的潜在适生区质心在34.29°N、108.78°E,较当前气候条件下向东迁移97.68 km;中排放情景下,白皮松的潜在适生区质心在34.34°N、109.28°E,较当前气候条件下向东迁移153.38 km;高排放情景下,白皮松的潜在适生区质心在33.91°N、111.73°N,较当前气候条件向东迁移380.93 km。

3 讨论

3.1 影响白皮松分布的主导因子

本研究以白皮松为研究对象利用MaxEnt模型,



注:(a)为中国目前气候条件下白皮松适生区的分布情况;(b)为SSP126情景下2080—2100年白皮松在中国的潜在适生区分布;(c)为SSP370情景下2080—2100年白皮松在中国的潜在适生区分布;(d)为SSP585情景下2080—2100年白皮松在中国的潜在适生区分布。

图5 白皮松可能适生区的预测研究

Fig. 5 Study on the prediction of possible suitable area of *Pinus bungean*

表3 未来不同气候情景下白皮松潜在适生区面积

Tab. 3 Potential suitable area of *Pinus bungeana* under different climate scenarios in the future

适生区	当前面积/10^4 km^2	2080—2100年SSP126		2080—2100年SSP370		2080—2100年SSP585	
		面积/10^4 km^2	面积变化比例/%	面积/10^4 km^2	面积变化比例/%	面积/10^4 km^2	面积变化比例/%
高适生区	23.23	19.38	−16.57	20.60	−11.32	20.48	−11.84
中适生区	22.40	22.37	−0.13	19.99	−10.75	22.46	0. 27
低适生区	28.95	29.15	0.69	30.17	4.21	31.97	10.43
总计	74.58	70.90	−4.93	70.76	−5.12	74.91	0.44

对当前及未来不同变化情景下的潜在分布进行了模拟,综合分析主导气候因子贡献率、训练增益值,并通过绘制主导环境因子响应曲线,分析适宜白皮松的生长环境条件,对白皮松天然分布的环境进行了量化,得出当前气候条件下限制白皮松分布的主要气候因子为最冷月最低温,同时也体现了白皮松具有较强抗寒能力,天然分布于气候冷凉的石山上[25]。未来中、低排放情景下,限制白皮松潜在适生区的主导气候因子仍然以最冷月最低温为主,与高排放情景相比,中、低排放情景下增温幅度较小,降雨格局影响较小有关[58]。有研究表明,在全球气候变暖的背景下,西北地区升温加快,变暖程度增强[59-60]且在华北、西北地区东部夏季降雨量明显下降[61],导致白皮松生理干旱,分布区西部面积减小,而分布区东部强降雨量逐渐增大[62],弥补了温度上升对于白皮松生存的影响,白皮松质心

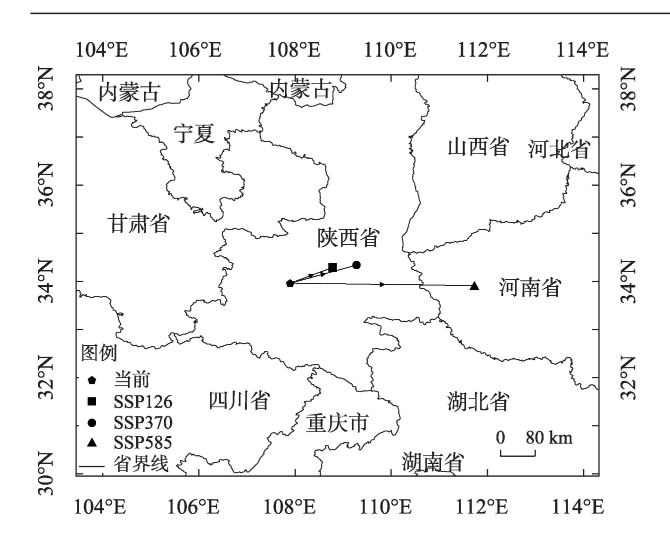


图6 不同气候情景下白皮松适生区质心移动

Fig. 6 Centroid movement of *Pinus bungeana* suitable area under different climate scenarios

向东迁移,限制白皮松潜在适生区的主导气候因子以年降水量为主,且白皮松分布区北部受到400 mm等降雨线影响,加剧了质心向东迁移。

白皮松种子具有一定的生理休眠特征,不解除休眠的种子难以萌发,发芽率较低且持续时间较长[63]。温度可直接作用于吸水和生理代谢反应来调控种子萌发过程,从而影响种子的发芽率和萌发速率[64],白皮松种子经过低温处理或冬季低温过程,一般可打破休眠[25],温度过高会阻碍白皮松种子萌发的进程[65]。彭剑峰等[66]指出,生长季初期的高温会导致白皮松出现生理性缺水影响其正常生长发育。较暖的温度也可能通过与热损伤或热应激相关的生理机制直接作用于树木,特别是当温度超过22.5 ℃,白皮松的死亡率升高[67],而且需要通过春化作用的途径调节从营养生长到生殖生长的过渡[65],这就表明白皮松不适宜生长在温度较高地区,喜好冷凉环境。

3.2 白皮松在中国潜在适生区的地理分布

MaxEnt模型的预测结果表明当前气候条件下,白皮松在中国的中、高适生区主要分布在甘肃东南部、山西、陕西、河南、四川北部、湖北西部等地,与当前的野生分布点重合度高,表明模型预测结果精度高。根据模型结果(图5)可以看出,中、高适生区分布范围主要在31.86°~38.79°N和103.67°~115.74°E之间。未来不同气候情景下,中、高适生区分布范围在分布区东西部变化较大,低排放情景下,增温幅度较小,白皮松潜在分布范围较当前气候情景变化较小;中排放情景下,升温较快,白皮松潜在分布范围有向东移动的趋势;高排放情景下,随着碳排放浓度的升高,升温加快,整体呈现向东移动的趋势。未来在不同碳排放浓度下,低适生区在中国境内的变化,主要表现在东部,从当前的116.48°E移动到高排放情景(SSP585)下118.98°E,整体向东移动,移动距离约277.5 km,这与高排放情景下增温幅度大、降雨量增加有关[68]。

本研究模拟得到的当前气候条件下,潜在适生区总面积为74.58×10^4 km^2,已有研究显示,存在概率0.33以上地区,有更高的生物生存概率,有利于生物的生长[69-70]。因此,以模拟得到的高适生区和中适生区为白皮松的核心适生区,其面积为45.63×10^4 km^2(存在概率>0.33)。本研究模拟得到的白皮松潜在适生分布区,在未来不同气候情景下,呈现3种不同情形包括:适生度降低,如甘肃省庆阳市合水县以及华池县、陕西省延安市和铜川市,未来3种气候情景下,核心适生区面积表现为不同程度的减少,尤其以陕西省延安市和铜川市在高排放情景下,核心适生区大面积减少,陕西省北部黄龙山林区,在高排放情景下,核心适生区面积大范围减少,而该地为国家一级保护动物褐马鸡在西部地区的主要分布地点,针对该区域,应进一步加大宣传教育力度,督促、引导周边群众养成保护白皮松林的意识,加强对白皮松天然林资源的管护防治,加大对上述地区白皮松种质资源的收集与保护;适生度不变,如山西省西南部和河南省西北部,针对该区域,除保护好现存的白皮松天然林资源,还需营建异地遗传资源保存林,以确保白皮松多样性不丢失;适生度升高,如陕西省宝鸡市太和县和西安市周至县,在高排放情景下,核心适生区大范围扩张,白皮松作为西部地区生态工程造林的优良树种,针对该区域,可以选择白皮松作为生态工程的造林树种。

本研究从气候因子和植物地理分布的角度对白皮松的可能分布进行了探究,且各因子间可能存在相互影响,尽管白皮松分布在石灰质土壤,其理化性质稳定,在未来气候变化背景下,对石灰质土壤理化性质会产生何种影响,缺乏相关研究,今后可在选择影响该物种生长的气候、地形、土壤等综合环境变量开展研究,以期获得能够更好地保护白皮松的研究结果;MaxEnt模型是在环境相似的基础上建立的,没有考虑生物的生长特征,迁移能力,天

然更新能力,生物之间的相互作用等[71]。然而,通过MaxEnt模型模拟得到的白皮松潜在分布区存在着类似的气候特征,可为白皮松的保护和生态工程利用提供一定的参考依据。

4 结 论

本研究基于MaxEnt模型分析表明,低温是当前影响白皮松分布的主导气候因子,且在未来低、中排放情景下低温仍然是主导影响因子,只有在高排放情景下,年降水将转化为主导因子;当前白皮松潜在适生区主要分布在甘肃东南部、山西、陕西、河南、四川北部、湖北西部等地,潜在适生区面积为74.58× 10^4 km^2,其中核心适生区面积为45.63× 10^4 km^2。白皮松在未来低、中排放情景下潜在适生区将有不同程度的缩小,在高排放情景呈现小范围扩张趋势,且在未来3种排放情景下呈现不同程度的东移趋势,特别是高排放途径最为明显。同时,结合各适生区的变化,本研究还为白皮松的物种保护和人工造林提出了相应的建议。

参考文献(References):

[1] 黄蕊, 徐利岗, 刘俊民. 中国西北干旱区气温时空变化特征[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4078-4089. [Huang Rui, Xu Ligang, Liu Junmin. Research on spatio-temporal change of temperature in the Northwest Arid Area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4078-4089.]

[2] 黄小燕, 李耀辉, 冯建英, 等. 中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1359-1370. [Huang Xiaoyan, Li Yaohui, Feng Jianying, et al. Climate characteristics of precipitation and extreme drought events in Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1359-1370.]

[3] 张雅茜, 王淋, 包福海, 等. 应用最大熵模型预测的欧李潜在适生区分布及气候变化对其的影响[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(11): 54-62. [Zhang Yaqian, Wang Lin, Bao Fuhai, et al. Distribution of potential suitable areas of *Cerasus humilis* by using Maxent model and effect of climate change on it[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(11): 54-62.]

[4] Stocker D B, Zscheischler J, Keenan F T, et al. Drought impacts on terrestrial primary production underestimated by satellite monitoring[J]. Nature Geoscience, 2019, 12(4): 264-270.

[5] 王卓妮, 袁佳双, 庞博, 等. IPCC AR6 WGⅢ报告减缓主要结论、亮点和启示[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(5): 531-537. [Wang Zhuoni, Yuan Jiashuang, Pang Bo, et al. The interpretation and highlights on mitigation of climate change in lPCC AR6 WGШ report[J]. Advances in Climate Change Research, 2022, 18(5): 531-537.]

[6] 陈建国, 杨扬, 孙航. 高山植物对全球气候变暖的响应研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(3): 435-446. [Chen Jianguo, Yang Yang, Sun Hang. Advances in the studies of responses of alpine plants to global warming[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2011, 17(3): 435-446.]

[7] 王馨, 杨淑桂, 于芬, 等. 檫木的研究进展[J]. 南方林业科学, 2015, 43(5): 29-33, 39. [Wang Xin, Yang Shugui, Yu Fen, et al. Research progress of *Sassafras tzumu*[J]. South China Forestry Science, 2015, 43(5): 29-33, 39.]

[8] Wiens J A, Stralberg D, Jongsomjit D, et al. Niches, models, and climate change: Assessing the assumptions and uncertainties[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(Supplement_2): 19729-19736.

[9] 叶兴状, 张明珠, 赖文峰, 等. 基于MaxEnt优化模型的闽楠潜在适宜分布预测[J]. 生态学报, 2021, 41(20): 8135-8144. [Ye Xingzhuang, Zhang Mingzhu, Lai Wenfeng, et al. Prediction of potential suitable distribution of *Phoebe bournei* based on MaxEnt optimization model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20): 8135-8144.]

[10] Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, et al. lmpacts of climate change on the future of biodiversity[J]. Ecology Letters, 2012, 15(4): 365-377.

[11] Busby J R. BIOCLIM-a bioclimate analysis and prediction system[J]. Plant Protection Quarterly (Australia), 1991, 6(1): 8-9.

[12] 魏博, 孙芳芳, 马新, 等. 荒漠濒危植物裸果木适宜分布区对未来气候变化情景的可能响应[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2019, 37(4): 490-497. [Wei Bo, Sun Fangfang, Ma Xin, et al. Possible response of the suitable distribution areas of endangered desert plant *Gymnocarpos przewalskii* to future climate change scenario[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2019, 37(4): 490-497.]

[13] Stockwell D. The GARP modelling system: Problems and solutions to automated spatial prediction[J]. International Journal of Geographical Information Science, 1999, 13(2): 143-158.

[14] Hastie T, Tibshirani R. Generalized additive models: Some applications[J]. Journal of the American Statistical Association, 1987, 82(398): 371-386.

[15] Nelder J A, Wedderburn R W M. Generalized linear models[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society, 1972, 135(3): 370-384.

[16] Beaumont Linda J Hughes Lesley, Pitman A J. Why is the choice of future climate scenarios for species distribution modelling important? [J]. Ecology Letters, 2008, 11: 1135-1146.

[17] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 557-567. [Xu Zhonglin, Peng Huanhua, Peng Shouzhang. The development and evaluation of species distribution models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 557-567.]

[18] Merow C, Smith M J, Edwards Jr T C, et al. What do we gain from simplicity versus complexity in species distribution models? [J]. Ecography, 2014, 37(12): 1267−1281.

[19] Merow C, Smith M J, Silander Jr J A. A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter[J]. Ecography, 2013, 36(10): 1058−1069.

[20] 王晓帆, 段雨萱, 金露露, 等. 基于优化的最大熵模型预测中国高山栎组植物的历史、现状与未来分布变化[J]. 生态学报, 2023, 43(16): 6590−6604. [Wang Xiaofan, Duan Yuxuan, Jin Lulu, et al. Prediction of historical, present and future distribution of *Quercus* sect. *Heterobalanus* based on the optimized MaxEnt model in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6590−6604.]

[21] Phillips S, Anderson R, Schapire R, et al. Maximum entropy modeling of species geographic distribution[J]. Ecological Modelling, 2013, 190: 231−259.

[22] 方文培, 张泽荣. 中国植物志第五十二卷第二分册 [M]. 北京: 科学出版社, 1983: 64−65. [Fang Wenpei, Zhang Zerong. Flora of China Volume 52, Volume 2[M]. Beijing: Science Press, 1983: 64−65.]

[23] Moosavi S J, Budde K B, Mueller M, et al. Genetic diversity and fine-scale spatial genetic structure of the near-threatened *Pinus gerardiana* in Gardiz, Afghanistan[J]. Plant Ecology and Evolution, 2022, 155(3): 363−378.

[24] 彭重华, 薄楠林. 白皮松研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(11): 174−178. [Peng Chonghua, Bo Nanlin. Research progress in *Pinus bungeana*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(11): 174−178.]

[25] 李斌, 顾万春. 白皮松分布特点与研究进展[J]. 林业科学研究, 2003, 16(2): 225−232. [Li Bin, Gu Wanchun. Distribution characteristics and research progress of *Pinus bungeana*[J]. Forest Research, 2003, 16(2): 225−232.]

[26] 张建国, 李吉跃, 姜金璞. 京西山区人工林水分参数的研究(Ⅲ)[J]. 北京林业大学学报, 1994, 16(4): 46−54. [Zhang Jianguo, Li Jiyue, Jiang Jinpu. Study on water parameters of plantation in mountainous area of Western Beijing (Ⅲ)[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1994, 16(4): 46−54.]

[27] 张力强. 白皮松群落结构与生产力研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007. [Zhang Liqiang. Study on Community Structure and Productivity of *Pinus bungeana* Forest[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007.]

[28] 岳华峰, 吴晗彬, 樊巍, 等. 白皮松天然林更新与种群结构分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(3): 99−106, 154. [Yue Huafeng, Wu Hanbin, Fan Wei, et al. Regeneration and population structure of natural *Pinus bungeana* forest[J]. Journal of Central South University of Forestry-Technology, 2023, 43(3): 99−106, 154.]

[29] 赵焱, 张学忠, 王孝安. 白皮松天然林地理分布规律研究[J]. 西北植物学报, 1995, 15(2): 161−166. [Zhao Yan, Zhang Xuezhong, Wang Xiao'an. A Study on geographical distribution law of *Pinus bungeana* natural, forests in China[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1995, 15(2): 161−166.]

[30] Tian Q, El-Kassaby Y A, Li W. Revealing the genetic structure and differentiation in endangered *Pinus bungeana* by genome-wide SNP markers[J]. Forests, 2022, 13(2): 326.

[31] 邓鑫. 基于Elman神经网络的白皮松潜在适生区估测及未来分布趋势研究[D]. 西安: 西北大学, 2013. [Deng Xin. The Application of Elman Artificial Neural Networks for Modelling the Distribution of *Pinus bungeana* in Present and Future[D]. Xi'an: Northwest University, 2013.]

[32] 唐梦, 陈静, 杨灵懿, 等. 气候变化下中国主要生物燃油树种分布与变迁[J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10156−10170. [Tang Meng, Chen Jing, Yang Lingyi, et al. Distribution and change of major biofuel tree species in China under climate change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10156−10170.]

[33] 张华, 赵浩翔, 徐存刚. 气候变化背景下孑遗植物桫椤在中国的潜在地理分布[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 968−979. [Zhang Hua, Zhao Haoxiang, Xu Cungang. The potential geographical distribution of *Alsophila spinulosain* under climate change in China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4): 968−979.]

[34] 张艳芳. 基于MaxEnt模型预测花烟草全球潜在适生区的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024. [Zhang Yanfang. Prediction of Global Potential Suitable Habitats of *Nicotiana alata* Link et Otto Based on MaxEnt Model abstract[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2024.]

[35] 宋金岳. 基于生态位模型的气候变化情景下红火蚁在中国的适生区预测[D]. 兰州: 西北师范大学, 2022. [Song Jinyue. Prediction of Suitable habitats of *Solenopsis invicta* in China under Climate Change Scenarios Based on Niche Model[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2022.]

[36] Cobos M E, Peterson A T, Barve N, et al. Kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using MaxEnt [J]. PeerJ, 2019, 7: e6281.

[37] 曹雪萍, 王婧如, 鲁松松, 等. 气候变化情景下基于最大熵模型的青海云杉潜在分布格局模拟[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5232−5240. [Cao Xueping, Wang Jingru, Lu Songsong, et al. Simulation of the potential distribution patterns of *Picea crassifolia* in climate change scenarios based on the maximum entropy (Maxent) model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5232−5240.]

[38] 张晓玮, 王婧如, 王明浩, 等. 中国云杉属树种地理分布格局的主导气候因子[J]. 林业科学, 2020, 56(4): 1−11. [Zhang Xiaowei, Wang Jingru, Wang Minghao, et al. Dominant climatic factors influencing the geographical distribution pattern of *Picea* in China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(4): 1−11.]

[39] 魏鹏, 张源, 何佳遥, 等. 基于MaxEnt模型分析气候变化下玉米褪绿斑驳病毒的潜在地理分布[J]. 植物保护学报, 2022, 49(5): 1367−1376. [Wei Peng, Zhang Yuan, He Jiayao, et al. Potential geographic distribution of maize chlorotic mottle virus under climate changes based on MaxEnt model[J]. Journal of Plant Protection, 2022, 49(5): 1367−1376.]

[40] 赖雨曈. CMIP6全球气候模式对中国地区干旱模拟能力评估与未来预估[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2023. [Lai Yutong. Assessment of Simulation Capability and Projection of Drought over China Based on CMIP6 Global Climate Models[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2023.]

[41] Qin P, Xie Z, Jia B, et al. Characteristics of population exposure to climate extremes from regional to global 1.5 ℃ and 2.0 ℃ warming in CMIP6 models[J]. Environmental Research Letters, 2023, 19 (1): 014018.

[42] Yang M, Li Z, Anjum M N, et al. Projection of streamflow changes under CMIP6 scenarios in the Urumqi River head watershed, Tianshan Mountain, China[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 857854.

[43] Luo Neng, Guo Yan, Chou Jieming, et al. Added value of CMIP6 models over CMIP5 models in simulating the climatological precipitation extremes in China[J]. International Journal of Climatology, 2021, 42(2): 1148-1164.

[44] 史柠瑞, 朱珠, 王艳莉. 基于MaxEnt模型对2种青兰属植物在未来气候变化下潜在分布的预测研究[J]. 中国农学通报, 2023, 39(32): 115-123. [Shi Ningrui, Zhu Zhu, Wang Yanli. Potential distribution prediction of two species of *Dracocephalum* L. under future climate change based on MaxEnt model[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(32): 115-123.]

[45] 宦智群, 耿兴敏, 徐小蓉, 等. 基于MaxEnt模型分析不同气候变化情景下的黄心夜合(*Michelia martinii*)潜在地理分布[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(10): 1277-1287. [Huan Zhiqun, Geng Xingmin, Xu Xiaorong, et al. Potential geographical Distribution of *Michelia martinii* under different climate change scenarios based on MaxEnt model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(10): 1277-1287.]

[46] 李晓辰, 贡璐, 魏博, 等. 气候变化对新疆雪岭云杉潜在适宜分布及生态位分化的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 4091-4100. [Li Xiaochen, Gong Lu, Wei Bo, et al. Effects of climate change on potential distribution and niche differentiation of *Picea schrenkiana* in Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 4091-4100.]

[47] 赵儒楠, 何倩倩, 褚晓洁, 等. 气候变化下千金榆在我国潜在分布区预测[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3833-3843. [Zhao Runan, He Qianqian, Chu Xiaojie, et al. Prediction of potential distribution of *Carpinus cordata* in China under climate change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(11): 3833-3843.]

[48] 熊中人, 张晓晨, 邹旭, 等. 中国天山花楸适生区预测及其对气候变化的响应[J]. 生态科学, 2019, 38(5): 44-51. [Xiong Zhongren, Zhang Xiaochen, Zou Xu, et al. Prediction of the suitable distribution and responses to climate change of *Sorbus tianschanica* in China[J]. Ecological Science, 2019, 38(5): 44-51.]

[49] 刘维, 赵儒楠, 圣倩倩, 等. 矮牡丹在中国的地理分布及潜在分布区预测[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(12): 83-92. [Liu Wei, Zhao Runan, Sheng Qianqian, et al. Geographical distribution and potential distribution area prediction of *Paeonia jishanensis* in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43 (12): 83-92.]

[50] 欧阳林男, 陈少雄, 张维耀, 等. 柠檬桉在中国的适生地理分布及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 361-367. [Ouyang Linnan, Chen Shaoxiong, Zhang Weiyao, et al. The suitable geographic range for *Corymbia citriodora* in China and the influencing factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(2): 361-367.]

[51] 钟淇涵. 基于物种分布模型的科尔沁沙地元宝枫潜在适生区研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023. [Zhong Qihan. Study on Predicting Potential Suitable Area of *Acer truncatum* Bungein Horqin Sand Land Based on Species Distribution Models[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.]

[52] Araujo M B, Pearson R C, Thuller W, Erhard M. Validation of species—climate impact models under climate change[J]. Global Change Biology, 2005, 11(9): 1504-1513.

[53] 应邦肯, 田阔, 郭浩宇, 等. 基于MaxEnt模型预测未来气候变化情境下红树秋茄(*Kandelia obovata*)在中国潜在适生区的变化[J]. 生态学报, 2024, 44(1): 224-234. [Ying Bangken, Tian Kuo, Guo Haoyu, et al. Predicting potential suitable habitats of *Kandelia obovata* in China under future climatic scenarios based on MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 224-234.]

[54] 张丹红, 王效科, 张路, 等. 大比例尺土壤保持服务制图分级方法研究[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1391-1401. [Zhang Danhong, Wang Xiaoke, Zhang Lu, et al. Research on the classification methods of ecosystem service of soil retention for large-scale choropleth mapping[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1391-1401.]

[55] Zafirah N L A, Zulkifli Y, Mazlan H, et al. Predicting the habitat suitability of *Melaleuca cajuputi* based on the MaxEnt species distribution model[J]. Forests, 2021, 12(11): 1449.

[56] 李林霞, 何兰君, 席磊, 等. 中国南方松林地理替代分布规律及其气候主导因子研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2024, 44(1): 97-105. [Li Linxia, He Lanjun, Xi Lei, et al. Geographic alternative distribution pattern and its climate dominant factors of *Pinus* forests in Southern China[J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Science), 2024, 44(1): 97-105.]

[57] 张雷, 王琳琳, 刘世荣, 等. 生境概率预测值转换为二元值过程中4个阈值选择方法的比较评估——以珙桐和杉木生境预估为例[J]. 植物生态学报, 2017, 41(4): 387-395. [Zhang Lei, Wang Linlin, Liu Shirong, et al. Comparative evaluation of four threshold selection methods in the process of converting habitat probability prediction values into binary values-taking the habitat prediction of *Davidia involucrata* and *Cunninghamia lanceolata* as an example[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(4): 387-395.]

[58] Tian J, Zhang Z, Ahmed Z, et al. Projections of precipitation over China based on CMIP6 models[J]. Stochastic Environmental Re-

search and Risk Assessment, 2021, 35: 831−848.

[59] Wong M H G, Li R, Xu M, et al. An integrative approach to assessing the potential impacts of climate change on the Yunnan snub-nosed monkey[J]. Biological Conservation, 2013, 158: 401−409.

[60] 朱飙. 西北地区气候暖湿化背景下水汽、潜在蒸散及极端温度和降水的变化特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2023. [Zhu Biao. Variation Characteristics of Vapor, Potential Evapotranspiration and Extreme Temperature and Precipitation under the Background of Warming-wetting in Northwest China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.]

[61] 梁玉莲, 延晓冬. RCPs情景下中国21世纪气候变化预估及不确定性分析[J]. 热带气象学报, 2016, 32(2): 183−192. [Liang Yulian, Yan Xiaodong. Prediction and uncertainty analysis of climate change in China in the 21st century under RCPs scenario[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2016, 32(2): 183−192.]

[62] 翟颖佳. 中国华北地区和西北东部干旱气候变化特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2014. [Zhai Yingjia. The Characteristics of Arid Climate Change Over North China And Eastern Northwest China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.]

[63] 郭聪聪, 沈永宝, 史锋厚. 白皮松种子休眠研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 175−183. [Guo Congcong, Shen Yongbao, Shi Fenghou. Research progress on seed dormancy of *Pinus bungeana*[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2019, 43(2): 175−183.]

[64] 郭聪聪, 沈永宝, 史锋厚. 白皮松种子萌发过程中呼吸代谢和内源激素对温度变化的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(3): 25−36. [Guo Congcong, Shen Yongbao, Shi Fenghou. Response of respiration and hormones during germination of *Pinus bungeana* seeds to temperature changes[J]. Journal of Central South University of Forestry-Technology, 2021, 41(3): 25−36.]

[65] 郭聪聪, 沈永宝, 史锋厚. 温度对白皮松种子萌发过程中储藏物质代谢及酶活性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(6): 25−34. [Guo Congcong, Shen Yongbao, Shi Fenghou. Effects of temperature on storage substance metabolism and enzyme activity during seed germination of *Pinus bungeana*[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2023, 47(6): 25−34.]

[66] 彭剑峰, 刘玉振, 王婷. 神农山白皮松不同龄组年轮—气候关系及PDSI重建[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3509−3518. [Peng Jianfeng, Liu Yuzhen, Wang Ting. Ring-climate relationship and PDSI reconstruction of different age groups of *Pinus bungeana* in Shennong Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3509−3518.]

[67] Young Derek J N, Michèle R Slaton, Alexander Koltunov. Temperature is positively associated with tree mortality in California subalpine forests containing whitebark pine[J]. Ecosphere, 2023, 14 (2): e4400.

[68] Yang X, Zhou B, Xu Y, et al. CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38: 817−830.

[69] 欧阳林男, 陈少雄, 刘学锋, 等. 赤桉在中国的适生地理区域及其对气候变化的响应[J]. 林业科学, 2019, 55(12): 1−11. [Ouyang Linnan, Chen Shaoxiong, Liu Xuefeng, et al. Suitable geographic range for *Eucalyptus camaldulensis* in China and its response to climate change[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(12): 1−11.]

[70] 李宁宁, 张爱平, 张林, 等. 气候变化下青藏高原两种云杉植物的潜在适生区预测[J]. 植物研究, 2019, 39(3): 395−406. [Li Ningning, Zhang Aiping, Zhang Lin, et al. Predicting potential distribution of two species of spruce in Qinghai-Tibet Plateau under climate change[J]. Bulletin of Botanical Research, 2019, 39(3): 395−406.]

[71] 张晓玮, 蒋玉梅, 毕阳, 等. 基于MaxEnt模型的中国沙棘潜在适宜分布区分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1420−1428. [Zhang Xiaowei, Jiang Yumei, Bi Yang, et al. Identification of potential distribution area for *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* by the MaxEnt model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1420−1428.]

Prediction of potential suitable distribution area of *Pinus bungeana* in China under the background of climate change

FAN Yuke[1], REN Ju[1], WANG Runlong[1], ZHOU Dongdong[1], PAN Zikai[2], ZHANG Xiaowei[1], ZHOU Xiaolei[1]

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: This study was conducted to predict the distribution of potential suitable area and the impact of climate change and to determine the appropriate distribution range in the future, which could provide a reference for the protection of *Pinus bungeana* and its utilization in ecological engineering construction. Based on 83 wild distribution sites of *P. bungeana* and climate factor data, the MaxEnt model and ArcGIS software were used to simulate the potential suitable zone distribution of *P. bungeana* under the present and three climate change scenarios (SSP126, SSP370, and SSP585) (2080−2100, low-level, medium-level, and high greenhouse gas emission scenarios). In the MaxEnt model simulation, the AUC (area value under the subject operating characteristic curve) was > 0.973, and the prediction results were highly accurate. Under the present climate conditions, the potential suitable areas of *P. bungeana* were primarily distributed in Shaanxi Province, southern Shanxi Province, southeastern Gansu Province, northwestern Henan Province, and northwestern Hubei Province, with a total area of approximately 74.5×10^4 km^2, under the background of future climate change. The core suitable distribution areas were reduced to different degrees, with temperature being the primary limiting factor for the distribution of the potential growth zones of *P. bungeana*. Under low and medium greenhouse gas emission scenarios, temperature still remained the limiting factor for the distribution of the potential growth zones of *P. bungeana*. Under the high greenhouse gas emission scenario, the global temperature increased faster, and rainfall was the major limiting factor affecting the distribution of the suitable area of *P. bungeana*. The centroid of the suitable area of *P. bungeana* shifted eastward, especially being more sensitive under the high emission concentration of greenhouse gases, and the migration distance was farther. This study proposes the protection of *P. bungeana*, and the results provide a reference for ecological engineering construction using *P. bungeana*.

Keywords: maximum entropy (MaxEnt) model; *Pinus bungeana*; climate change; potential distribution area; China